Ferdowsi Civil Engineering, 38, 3, 2025. (75-96)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Peak Ground Acceleration's Impact on Semi-Active Fuzzy Control Using Adjustable Liquid Damper

Research Article

Javad Hashemi[1], Hamed Enayati[2]

DOI: 10.22067/jfcei.2025.92219.1344

1. Introduction

The increasing vulnerability of high-rise structures in seismically active regions highlights the urgent need for advanced control systems to mitigate their dynamic responses. In recent years, semi-active seismic control systems have emerged as a promising solution for enhancing the seismic resilience of structures. Among the various damping devices developed for this purpose, Tuned Liquid Dampers (TLDs) have attracted particular interest due to their simple configuration, cost-effectiveness, and ease of tuning. A TLD can simultaneously function as a water storage tank and a vibration mitigation device. The structural vibrations are dissipated through several mechanisms, including wave breaking, fluid–tank wall friction, curved flow paths, and hydrodynamic pressure variations inside the tank. To further improve their performance and enable semi-active control, researchers have proposed several modifications to traditional TLDs—such as incorporating baffles, perforated plates, and rotating baffles within the tank. These enhancements significantly increase the damping efficiency and broaden the operational frequency range of the system. This study investigates the effect of Peak Ground Acceleration (PGA) variations on the performance of a fuzzy-controlled Tuned Liquid Damper. A single-degree-of-freedom (SDOF) structure equipped with the proposed semi-active TLD is analyzed under a comprehensive set of earthquake ground motions, including pulse-like near-fault, non-pulse near-fault, and far-fault records. The fuzzy logic controller dynamically adjusts the baffle angle within the tank in real time to achieve optimal energy dissipation. A total of 30 earthquake records—comprising 10 pulse-type near-fault, 10 non-pulse near-fault, and 10 far-fault events—are used to assess the system's performance. The results provide valuable insights into the effectiveness and adaptability of the fuzzy-controlled TLD under different seismic intensity levels, demonstrating its potential as a reliable and efficient semi-active vibration control device for modern structures.

2. Methodology

In this study, the influence of earthquake intensity on the performance of semi-active structural control systems equipped with Tuned Liquid Damper with Variable Baffles (VBTLD) was investigated by comparing two control strategies: fuzzy logic control and linear optimal control. To this end, a simplified single-degree-of-freedom (SDOF) model was simulated under earthquake excitations with varying intensity levels corresponding to 0.1–0.9 g peak ground acceleration (PGA). The structure, characterized by a stiffness of 14,000 N/m and a mass of 300 kg, was considered as a prototype model to evaluate the performance of a fuzzy-controlled VBTLD. A schematic layout of the damper configuration is presented in Figure 1.

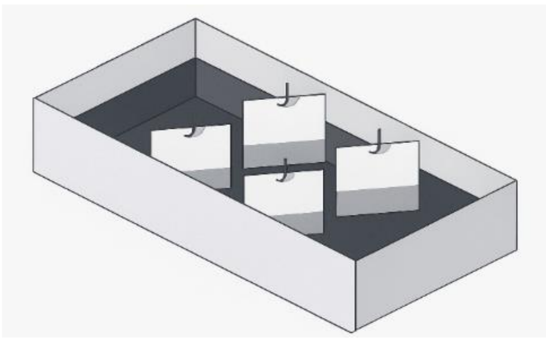


Figure 1. View of the Tuned Liquid Damper with Variable Baffles.

The comparative analysis between the fuzzy logic control and linear optimal control approaches was carried out to assess the efficiency of each method in reducing the structural seismic response. In this study, all baffles were assumed to rotate simultaneously within a defined angular

* Manuscript received 2025 February 16, Revised 2025 May 13, Accepted 2025 August 16.

1 MSc. Student, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

2 Corresponding author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran. **Email**: Hamed.enayati@mazust.ac.ir

range. The proposed VBTLD consists of four baffles arranged in two rows, with adjustable angles ranging from 0° to 90°. In the fully open position (0°), the baffles impose no obstruction to fluid motion, whereas in the fully closed configuration (90°), the tank is divided into three equal compartments. It should be noted that, consistent with previous studies, all baffles were rotated simultaneously, and eleven discrete baffle angles (ranging from 0° to 90° with 9° increments) were considered to evaluate the damper's performance. The system was subjected to a set of 30 earthquake ground motions, including 10 far-fault, 10 near-fault, and 10 pulse-type near-fault records. The structural responses under the two control strategies were then analyzed and compared to provide a comprehensive understanding of the semi-active TLD system's effectiveness under different seismic intensities.

3. Fuzzy Controller

In this study, fuzzy logic was used to evaluate how earthquake intensity affects the performance of adjustable-baffle tuned liquid dampers (TLDs) in controlling structural vibrations. Fuzzy control systems are particularly useful for this purpose because they can effectively model the complex and nonlinear behavior of mechanical systems such as liquid dampers, making them a powerful tool for intelligent vibration control. In the proposed control framework, the physical input parameters—namely structural displacement and velocity—are expressed as linguistic variables such as "small displacement" and "high velocity." Based on a predefined set of fuzzy rules, the controller determines the appropriate baffle angle of the damper. In essence, the fuzzy system acts as an intelligent controller that continuously adjusts the baffle angles to minimize the building's vibration response. To implement the controller, triangular membership functions were defined for both input and output variables: eight for the inputs and six for the outputs. These functions represent how strongly each physical parameter corresponds to its linguistic category. To achieve precise control of the system, a total of 64 fuzzy rules were developed based on the relationships between the system's input and output variables. These rules, expressed in the standard "IF–THEN" format and summarized in Table 1, model the system's behavior under various operating conditions.

4. Conclusion

This study investigates the effect of peak ground acceleration (PGA) variations on the performance of semi-active seismic control systems. A single-degree-of-freedom (SDOF) structure was modeled in MATLAB to simulate its dynamic behavior under different earthquake excitations. For near-fault pulse-type earthquakes, the fuzzy control system demonstrated significant effectiveness. The peak displacement was reduced by approximately 20% at a PGA of 0.9g. Moreover, RMS acceleration improved by around 15%, indicating the system's ability to adapt to the characteristic 1–2 Hz velocity pulses of these earthquakes.

Table 1. Fuzzy rule base for control system design.

Structural Displacement	Structural Velocity							
	NVL	NL	NM	NS	PS	PM	PL	PVL
NVL	EL	EL	EL	VL	S	S	VL	EL
NL	EL	EL	EL	L	M	S	L	VL
NM	VL	L	M	S	S	S	S	L
NS	L	M	S	VS	VS	S	M	L
PS	L	M	S	VS	VS	S	M	L
PM	L	S	S	S	S	M	L	VL
PL	VL	L	S	M	L	EL	EL	EL
PVL	EL	VL	S	S	VL	EL	EL	EL

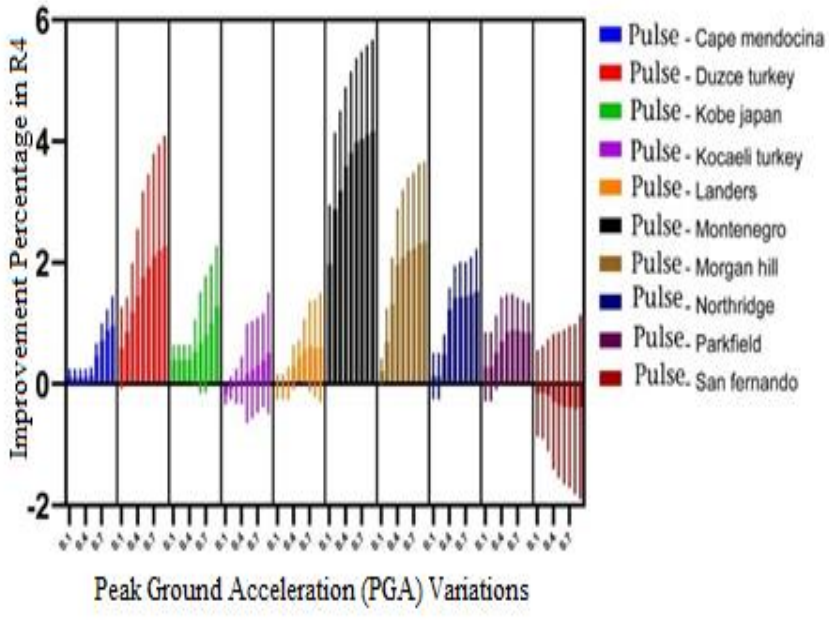


Figure 2. Effect of Peak Ground Acceleration Variations on the R4 Parameter under Near-Fault Pulse-Type Earthquakes

In near-fault non-pulse earthquakes, moderate improvements of 5–10% were observed due to their broader frequency content. For far-fault earthquakes, displacement reductions ranged from 2–5%. The fuzzy controller's performance increased with higher PGA levels. Improvements were modest at low intensities but became substantial at higher intensities. Overall, the fuzzy system outperformed both linear optimal and passive control strategies in reducing structural dynamic responses, particularly structural acceleration. These improvements were evident in both peak and RMS values of displacement and acceleration. Reduced acceleration not only enhances structural safety but also improves occupant comfort.

A key feature of the designed fuzzy controller is its ability to reduce acceleration continuously throughout the excitation period, not just at peak points. This capability arises from the adaptive nature of the fuzzy system, which optimizes the damping coefficient online according to the nonlinear behavior of the structure using fuzzy logic rules. In contrast, linear optimal control is limited under variable dynamic conditions due to its dependence on an accurate structural model, the need to solve complex equations, and computational delays. Figure 3 illustrates the overall superiority of fuzzy control over passive control in reducing peak acceleration. For earthquake records such as *Montenegro* and *Duzce, Turkey*, the fuzzy controller achieved noticeably higher peak roof acceleration reductions than passive control (approximately 4–5.5% and 2–4%, respectively). This improvement is attributed to the favorable alignment between the dominant pulse frequencies of these earthquakes and the optimal performance range of the adjustable-baffle TLD and its fuzzy rules. These records feature distinct velocity or displacement pulses, which the fuzzy system can effectively respond to. For records such as *Cape Mendocino* and *Kobe, Japan*, improvements ranged from 0.5% to 2%. The smaller gains are likely due to variations in frequency content, pulse duration, or pulse shape, which make it more challenging for the fuzzy controller to achieve optimal performance compared to the previously mentioned records.

The analysis of the results indicates that employing a fuzzy-controlled Tuned Liquid Damper (TLD) leads to a significant reduction in the dynamic responses of both displacement and acceleration for most earthquake records, compared to linear optimal and passive control strategies. As the peak ground acceleration (PGA) increases from 0.1g to 0.9g, the performance of the fuzzy control system steadily improves. Within the PGA range of 0.6g to 0.9g, reductions of up to 10% in peak roof displacement and up to 5% in RMS acceleration were observed. For far-fault earthquakes, the fuzzy controller generally outperformed linear optimal control. For instance, analysis of RMS roof acceleration showed reductions of up to 5%. RMS base shear results also revealed, in some long-duration records such as Landers (40 s), reductions in base shear RMS ranging from an average of 3.14% to a maximum of 4.88%. In scenarios requiring rapid structural response, such as near-fault pulse-type earthquakes (e.g., Cauca Valley), the fuzzy control system achieved a 20% reduction in peak displacement, whereas computational delays limited the performance of linear optimal control. For near-fault non-pulse earthquakes, the improvement of fuzzy control compared to linear optimal control was more moderate, ranging from 5–10%. Overall, fuzzy-controlled VBTLD systems are effective across all types of earthquakes,

although the magnitude of improvement varies with earthquake characteristics. The best performance was observed in near-fault pulse-type events.

In general, fuzzy-controlled VBTLD systems offer significant advantages for seismic protection, particularly in regions prone to strong near-fault pulse earthquakes. The PGA-dependent performance makes them a suitable option for high-risk areas. Nevertheless, the development of hybrid control systems could help overcome current limitations. Future research should focus on optimizing fuzzy rules for a wider range of seismic scenarios and investigating hybrid configurations to enhance overall seismic resilience. These findings represent an important step toward the development of adaptive seismic protection technologies for structural engineering applications.

مهندسی عمران فردوسی، ۳۸، ۳، ۱۴۰۴. (۹۶-۷۵)

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن بتن ایران

انجمن مهندسی روسازی ایران

اثر بیشینه شتاب زلزله بر کنترل فازی نیمه‌فعال سازه با میراگر مایع تنظیم شونده*

مقاله پژوهشی

جواد هاشمی[1]   حامد عنایتی[2]

DOI: 10.22067/jfcei.2025.92219.1344

چکیده *سازه‌های بلندمرتبه در مناطق لرزه‌خیز به سیستم‌های کنترلی کارآمد نیاز دارند تا پاسخ‌های دینامیکی شدید ناشی از زلزله را کاهش دهند. میراگرهای مایع با پره قابل تنظیم، به عنوان یک سیستم نیمه‌فعال، گزینه‌ای مؤثر برای این منظور محسوب می‌شوند. با این حال، سیستم‌های کنترل غیرفعال یا بهینه خطی ممکن است در تمامی سناریوهای لرزه‌ای عملکرد مطلوبی نداشته باشند؛ از این رو، توسعه سیستم‌های تطبیق‌پذیر مانند کنترل فازی که قابلیت تنظیم خودکار در لحظه را دارند، ضروری است. در این مطالعه، عملکرد کنترل فازی در مقایسه با روش‌های کنترل غیرفعال و بهینه خطی بر روی یک سازه یک درجه آزادی مجهز به میراگر مایع، تحت زلزله‌های متفاوت (حوزه دور ـ گسل، نزدیک ـ گسل و پالس نزدیک ـ گسل) با شدت‌های ۰٫۱ تا ۰٫۹ شتاب زمین، با استفاده از ۱۲ شاخص عملکردی بررسی شد. نتایج نشان داد که سیستم کنترل فازی به ویژه در زلزله‌های پالس نزدیک ـ گسل (مانند زلزله کوکائلی) با کاهش ۲۰ درصدی جابه‌جایی بام سازه، عملکرد بهتری دارد. همچنین، با افزایش شدت زلزله، کارایی این سیستم بهبود یافت و کاهش چشم‌گیری در ارتعاشات سازه مشاهده شد. در زلزله‌های حوزه دور ـ گسل نیز عملکرد کنترل فازی در اکثر موارد برابر یا بهتر از روش‌های دیگر بود و در برخی شاخص‌ها، میانگین کاهش ۲ تا ۵ درصدی ثبت شد. با این حال، در برخی زلزله‌های نزدیک ـ گسل، افزایش اندکی در جابه‌جایی و پاسخ طیفی سازه مشاهده شد که ناشی از ماهیت غیرخطی زمین‌لرزه‌های این حوزه است. همچنین، در موارد خاص، خطای تطبیقی سیستم کنترل فازی منجر به عملکرد ضعیف‌تر آن در مقایسه با کنترل بهینه خطی شد.*

واژه‌های کلیدی بیشینه شتاب زمین، کنترل فازی، پاسخ دینامیکی سازه، میراگر مایع تنظیم شونده، کنترل نیمه‌فعال.

Peak Ground Acceleration’s Impact on Semi-Active Fuzzy Control Using Adjustable Liquid Damper

Javad Hashemi   HamedEnayati

Abstract *Tall buildings in seismic regions require efficient control systems to mitigate severe dynamic responses induced by earthquakes. Adjustable baffle tuned liquid dampers, as a semi-active control system, have been proposed to reduce these responses. However, conventional passive or linear optimal control systems may not perform optimally under all seismic scenarios. Hence, developing adaptive systems such as fuzzy control with real-time self-adjusting capability is essential. This study evaluates the performance of fuzzy control compared to passive and linear quadratic regulator (LQR) control methods on a single-degree-of-freedom structure equipped with a liquid damper under various seismic excitations (far-field, near-fault, and near-fault pulse) with peak ground accelerations ranging from 0.1 to 0.9 g, using twelve performance indices. The results indicate that the fuzzy control system performs particularly well in near-fault pulse earthquakes (e.g., the Kocaeli earthquake), achieving approximately a 20% reduction in roof displacement. Moreover, as earthquake intensity increases, the system’s effectiveness improves, significantly reducing structural vibrations. In far-field earthquakes, fuzzy control generally matched or outperformed other methods, with an average reduction of 2–5% in certain indices. However, some near-fault earthquakes exhibited slight increases in displacement and spectral response due to the nonlinear nature of ground motions in such events. Additionally, in specific cases, adaptive errors in the fuzzy control system led to inferior performance compared to LQR control.*

Key words Peak ground acceleration, Fuzzy control, Structural dynamic response, Adjustable liquid damper, Semi-active control.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۱/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۵/۲۵ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران- ایران- مازندران- بهشهر.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران- ایران- مازندران- بهشهر.

Email: Hamed.enayati@mazust.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای نیمه‌فعال به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر زلزله مورد توجه قرار گرفته است. گستره وسیعی از میراگرها، از جمله انواع فلزی و مایع، در این زمینه مورد بررسی و توسعه قرار گرفته‌اند؛ به عنوان مثال در مطالعات اخیر، روستا و همکاران به بررسی عملکرد لرزه‌ای و به‌سازی قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از میراگرهای فلزی تسلیم شونده پرداخته‌اند [1-3]. این پژوهش‌ها، کارایی میراگرهایی مانند میراگرهای لوله‌ای فولادی (SPD) (Steel Panel Damper) و میراگرهای لوله‌ای دوگانه (DPD) (Dual-Pipe Damper) را در جذب انرژی، بهبود سختی و میرایی، و کاهش پاسخ سازه را در برابر تحریکات لرزه‌ای نشان داده‌اند. در میان این سیستم‌ها، میراگرهای مایع تنظیم شونده (TLD)(Tuned liquid damper) به دلیل سادگی، هزینه پایین و قابلیت تنظیم، از محبوبیت ویژه‌ای برخوردار هستند. این میراگرها با جذب انرژی ارتعاشات و تبدیل آن به انرژی حرارتی، به کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌ها کمک می‌کنند [4,5]. عملکرد میراگرهای مایع تنظیم‌شونده تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شدت و ویژگی‌های زلزله قرار دارد. برای بهبود کارایی این میراگرها، روش‌هایی مانند افزودن صفحات یا صفحات سوراخ‌دار به داخل مخزن پیشنهاد شده‌اند. تایت و دماتی نیز در سال ۲۰۰۵ با استفاده از صفحات سوراخ‌دار، رویکرد مشابهی را دنبال کردند [6]. لاو و تایت [7] در سال ۲۰۱۰ به بررسی اثرات مختلف این صفحات بر عملکرد میراگر مایع تنظیم شونده پرداختند. در همین راستا، زهرایی و همکاران [8] در سال ۲۰۱۱ رویکردی نوین را با استفاده از دریچه‌های قابل چرخش در مخزن میراگر مایع تنظیم شونده ارائه کردند که امکان تنظیم دقیق‌تر میزان میرایی را فراهم می‌کرد. همچنین زهرایی و عنایتی [9] در سال ۲۰۱۸ با بررسی عملکرد میراگر مایع مجهز به پره‌های قابل تنظیم، نشان دادند که با تنظیم مناسب زاویه پره‌ها می‌توان پاسخ لرزه‌ای سازه را به طور قابل توجهی کاهش داد؛ به عنوان مثال با تنظیم زاویه پره‌ها به ۲۰ درجه، بیشترین کاهش در جابه‌جایی سازه مشاهده شد. با توجه به اهمیت در نظر گرفتن ویژگی‌های تحریک لرزه‌ای، مطالعات متعددی به تأثیر انواع زلزله (حوزه نزدیک و دور از گسل) بر پاسخ سازه‌ها و عملکرد سیستم‌های کنترلی پرداخته‌اند؛ به عنوان مثال گرامی و همکاران [10] در سال ۲۰۱۸ در بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های مرکب، به تفاوت‌های قابل توجهی در جابه‌جایی و برش طبقات تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور از گسل اشاره کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که جابه‌جایی‌ها تحت زلزله‌های نزدیک گسل معمولا بیشتر است، اگر چه این اختلاف با افزایش ارتفاع سازه کاهش یافت. از سوی دیگر، توسعه سیستم‌های کنترلی هوشمند که قابلیت تنظیم خودکار در لحظه را دارند، ضروری به نظر می‌رسد.

زهرایی و شفیع‌زاده [11] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از کنترل فازی و میراگرهای قابل تنظیم، کاهش قابل توجهی در جابه‌جایی (۴۸٪) و شتاب (۴۰٪) ساختمان‌های بلند تحت اثر باد را گزارش کرده‌اند. باغبان و همکاران [12] در سال ۲۰۱۶ تأثیر مثبت کنترل‌کننده‌های فازی فعال و نیمه‌فعال بر عملکرد سازه‌های فولادی تحت زلزله را نشان داده‌اند و بر اهمیت در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای سازه‌ای تأکید کرده‌اند. عبدالطیف و حجازی [13] در سال ۲۰۲۳ با استفاده از یک سیستم فازی بهینه شده (FLMVOC) (Fuzzy logic multi verse optimal control)، کاهش قابل توجه شتاب سازه تحت زلزله‌های مختلف و ارتعاشات ناشی از باد را در سازه‌های بلندمرتبه مجهز به میراگر مغناطیسی نشان داده‌اند. این سیستم به ویژه در سازه شصت طبقه، توانست شتاب ناشی از زلزله‌های ال سنترو، کوبه و نورثریج را به ترتیب ۳۸، ۱۷ و ۱۰ درصد کاهش دهد. در زمینه استفاده از روش‌های هوشمند برای کنترل خسارت، کرم‌الدین و خواجه کرم‌الدین [14] در سال ۲۰۱۷ رویکردی نیمه‌فعال را مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ـ عصبی و میراگرهای مایع مغناطیسی معرفی کردند. پژوهش آن‌ها نشان داد که این سیستم قادر است شاخص خسارت پارک و انگ را به طور چشم‌گیری (تا ۷۶ درصد) کاهش دهد و در کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات و برش پایه عملکرد مناسبی دارد. همچنین، مطالعات بر اهمیت بهینه‌سازی و مکان‌یابی میراگرها در سازه‌های بلند، صرف نظر از نوع بارگذاری، تأکید دارند. در حالی که سیستم‌های کنترل غیرفعال مانند میراگر جرم تنظیم شونده (TMD) (Tuned mass damper) به دلیل سادگی و کارایی نسبی مورد توجه قرار گرفته‌اند، عملکرد آن‌ها تحت تأثیر ویژگی‌های مختلف زلزله متفاوت است. پورزینلی و همکاران [15] در سال ۲۰۱۴ در یک مطالعه تجربی بر روی عملکرد میراگر جرمی، دریافتند که کارایی این سیستم در برابر زلزله به شدت به محتوای فرکانسی آن بستگی دارد و در برخی موارد، با وجود

کارایی بالا در تحریکات هارمونیک می‌تواند منجر به افزایش پاسخ سازه نیز شود. این یافته‌ها بر نیاز به توسعه سیستم‌های کنترلی انعطاف‌پذیرتر و تطبیق‌پذیرتر تأکید می‌کند که بتوانند در برابر طیف وسیعی از تحریکات لرزه‌ای عملکرد مطلوبی ارائه دهند. علاوه بر این، خدایی و تیموری [16] در سال ۲۰۲۲ در بررسی تأثیر پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شونده (TMD) بر کنترل ارتعاشات ناشی از باد در ساختمان‌های بلند، نشان دادند که افزایش جرم میراگر جرمی و نصب آن در ترازهای بالاتر به طور چشم‌گیری ارتعاشات سازه را کاهش می‌دهد. عبددائم و همکاران [17] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از دمپر مغناطیسی رئولوژیکی (MR) (Magnetorheological) و کنترل‌کننده فازی، به کاهش قابل توجه خطر برخورد بین دو ساختمان کوپل شده دست یافته‌اند. عنایتی و روستا [18] در سال ۲۰۲۲ با بهره‌گیری از منطق فازی برای کنترل زاویه پره‌های میراگر مایع (VBTLD) (Variably baffled tuned liquid damper) بهبود عملکرد سازه یک درجه آزادی تحت زلزله‌های حوزه دور ـ گسل و نزدیک ـ گسل را گزارش کرده‌اند. این روش کنترل، به دلیل انعطاف‌پذیری و عدم نیاز به محاسبات پیچیده، نسبت به کنترل بهینه خطی در کاهش برش پایه و پاسخ سازه عملکرد بهتری داشت. بهمئی و زهرایی [19] در سال ۲۰۲۳ کارایی سیستم‌های کنترل فازی نوع یک و دو در سازه‌های مجهز به میراگرهای مغناطیسی را مقایسه کرده و برتری سیستم‌های فازی نوع ۲ را در کاهش پاسخ لرزه‌ای نشان داده‌اند. در سال ۲۰۲۳ زمانیان و همکاران [20] نیز با استفاده از میراگر مغناطیسی با کنترل‌کننده فازی، تغییرات حداکثر تغییر مکان و برش پایه سازه‌های نامنظم را تحت زلزله‌های نزدیک ـ گسل و دور ـ گسل بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که این سیستم در کاهش حداکثر تغییر مکان و برش پایه سازه، به ویژه در سازه‌هایی با نامنظمی در طبقات پایین‌تر، بسیار مؤثر است. بهمئی و زهرایی [21] نیز در سال ۲۰۲۳ با استفاده از میراگر سیال مغناطیسی و کنترل فازی، به کاهش خطر برخورد دو سازه سه و نه طبقه تحت زلزله پرداخته و بهبود قابل توجهی را در پاسخ‌های لرزه‌ای این سازه‌ها گزارش کرده‌اند. به طور خاص، این روش برای زلزله‌های حوزه دور ـ گسل نسبت به حوزه نزدیک، ۹,۷۱ درصد عملکرد بهتری داشته است. همچنین، بیشینه جابه‌جایی طبقه، شتاب، برش پایه و جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه سه طبقه به ترتیب ۱۷/۵۳، ۴/۹۴، ۳/۵۸ و ۱۲/۷ درصد و در سازه نه طبقه ۷/۹۳، ۷/۰۵، ۰/۶۷ و ۹/۱۳ درصد بهبود یافته است.

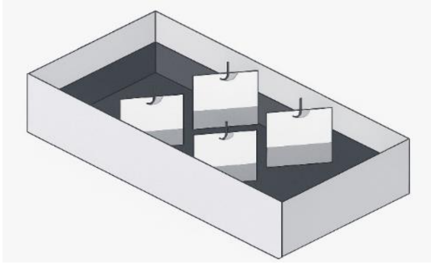
در این پژوهش، با تمرکز بر بررسی اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین (PGA) (Peak ground acceleration) بر عملکرد میراگر مایع تنظیم شونده تحت کنترل فازی، یک سازه یک درجه آزادی مجهز به این میراگر تحت مجموعه گسترده‌ای از رکوردهای زلزله (پالس حوزه نزدیک ـ گسل، حوزه نزدیک ـ گسل و حوزه دور ـ گسل) قرار گرفته است. این سیستم که توانایی تطبیق خودکار زاویه پره‌ها بر اساس الگوریتم فازی را دارد، تحت ۳۰ رکورد زلزله (۱۰ رکورد پالس حوزه نزدیک ـ گسل با پالس‌های بلندمدت، ۱۰ رکورد حوزه نزدیک ـ گسل و ۱۰ رکورد دور ـ گسل) مورد ارزیابی قرار گرفته است تا کارایی میراگر تحت کنترلر مورد نظر به طور جامع بررسی شود.

مدل مورد مطالعه

در این مطالعه، به منظور بررسی تأثیر شدت زلزله بر کارایی سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال سازه مجهز به میراگر مایع تنظیم شونده، دو روش کنترل فازی و بهینه خطی مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور، یک مدل ساده شده از سازه یک درجه آزادی تحت تأثیر زلزله‌های با شدت‌های (۰/۰–۹/۱ شتاب زمین) شبیه‌سازی شد. این سازه با مشخصات سختی ۱۴۰۰۰ نیوتن بر متر و جرم ۳۰۰ کیلوگرم، به عنوان یک نمونه اولیه برای بررسی عملکرد میراگر مایع با پره قابل تنظیم تحت کنترل فازی در نظر گرفته شد. طرح کلی این میراگر که از نتایج آزمایشگاهی عنایتی و زهرایی اقتباس شده است [9]، در شکل (۱) نمایش داده شده است. با مقایسه عملکرد سیستم کنترل فازی با حالت کنترل بهینه خطی، به ارزیابی کارایی هر یک از این روش‌ها در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه پرداخته شد.

یکسان و در محدوده‌ای مشخص در نظر گرفته شده است. میراگری که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، دارای چهار پره در دو ردیف است که زاویه آن‌ها بین صفر تا ۹۰ درجه قابل تنظیم است. در حالت کاملا باز (زاویه صفر درجه)، پره‌ها مانعی برای جریان سیال ایجاد نمی‌کنند و در حالت کاملا بسته (زاویه ۹۰ درجه)، مخزن میراگر به سه قسمت مساوی تقسیم می‌شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش، همانند مطالعات پیشین، جهت چرخش همه پره‌ها به صورت همزمان تغییر می‌کند و ۱۱ زاویه مختلف بین صفر تا ۹۰ درجه (با گام ۹ درجه) برای بررسی

عملکرد میراگر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ نمایی از میراگر مایع با پره قابل تنظیم

در این پژوهش، جهت چرخش پره‌های میراگر به صورت

در این تحقیق، سی رکورد زلزله مختلف شامل ده رکورد حوزه دور ـ گسل، ده رکورد حوزه نزدیک ـ گسل و ده رکورد پالس حوزه نزدیک ـ گسل به سازه اعمال شده و پاسخ‌های آن در حالت‌های مختلف کنترل مورد بررسی قرار گرفته است. زلزله‌های حوزه دور ـ گسل به دلیل پراکندگی انرژی در مسافت‌های طولانی، شتاب‌نگاشت‌هایی با دامنه کم و فرکانس‌های پایین‌تر دارند. در مقابل، زلزله‌های حوزه نزدیک ـ گسل به دلیل تمرکز انرژی در نزدیکی گسل، دارای پالس‌های قوی و کوتاه‌مدت هستند که به سازه‌ها آسیب بیشتری وارد می‌کنند. زلزله‌های حوزه نزدیک ـ گسل پالسی نیز زیرمجموعه‌ای از زلزله‌های حوزه نزدیک ـ گسل هستند که دارای پالس‌های بسیار قوی و مشخصی می‌باشند. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات رکورد های زلزله مورد استفاده

	نام رکورد زلزله	نام ایستگاه ثبت	بیشینه شتاب زمین (m/s^2)
		رکوردهای حوزه دور ـ گسل	
F1	Borah Peak	TRA-670 ATR Reactor Bldg (Bsmt)	۰/۰۲
F2	Northern Calif	Shelter Cove, Sta A	۰/۰۳
F3	San Fernando	Wheeler Ridge - Ground	۰/۰۳
F4	Landers	Silent Valley - Poppet Flat	۰/۰۵
F5	Northridge Mojave	Oak Creek Canyon	۰/۰۵
F6	Loma Prieta	APEEL 3E Hayward CSUH	۰/۰۸
F7	Hollister	Hollister City Hall	۰/۰۹
F8	Coalinga	Parkfield - Cholame	۰/۱
F9	N. Palm Springs	Temecula - 6th & Mercedes	۰/۱۱
F10	Trinidad offshore1983	Rio Dell Overpass	۰/۱۸
		رکوردهای حوزه نزدیک ـ گسل	
N1	San Francisco	Golden Gate Park	۰/۰۹
N2	Kern County	Taft Lincoln School	۰/۱۶
N3	San Fernando	Lake Hughes #9	۰/۱۷
N4	Oroville	Johnson Ranch	۰/۱۹
N5	Imperial Valley	Chihuahua	۰/۲۷
N6	Friuli Italy	Tolmezzo	۰/۳۶
N7	Parkfield	Cholame - Shandon	۰/۳۷
N8	Kobe Japan	Nishi-Akashi	۰/۴۸
N9	Nahanni Canada	Site 1	۱/۱۱
N10	Cape Mendocino	Cape Mendocino	۱/۴۹

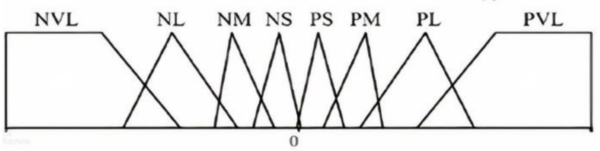
ادامه جدول ۱ مشخصات رکورد های زلزله مورد استفاده

بیشینه شتاب زمین (m/s^2)	نام ایستگاه ثبت	نام رکورد زلزله	
رکوردهای پالس حوزه نزدیک ـ گسل			
۰/۱۳	6281992, Barstow	Landers	P1
۰/۲۱	Arcelik	Kocaeli	P2
۰/۲۲	Gilroy Array #6	Morgan Hill	P3
۰/۳۷	Bar-Skupstina Opstine	Montenegro	P4
۰/۵۹	Petrolia	Cape Mendocino	P5
۰/۷۴	Bolu	Duzce Turkey	P6
۰/۸	Parkfield-Cholame	Parkfield-02	P7
۰/۸۳	KJMA	Kobe	P8
۰/۸۴	Sylmar - Olive View Med	Northridge-01	P9
۱/۲۲	Pacoima Dam	San Fernando	P10

در این مطالعه، برای بررسی پاسخ سازه‌ها در برابر زلزله، از رکوردهای زلزله‌ای استفاده شده است که مؤلفه شمالی ـ جنوبی آن‌ها (یا مؤلفه‌ای که پس از چرخش، با جهت غالب حرکت زمین همراستا شده است) برای تحلیل در نظر گرفته شده است. این رویکرد با اهمیت انطباق جهت رکوردهای زلزله با جهت حرکت غالب زمین سازگار است. به ویژه در مناطق نزدیک گسل (Near-Fault Regions)، استاندارد ASCE 7-16 (Section 12.9.4.1) و راهنمای FEMA P-695 (در انتخاب رکوردهای Near-Field) بر لزوم در نظر گرفتن اثرات جهت‌پذیری (Directivity Effect) تأکید می‌کنند. پدیده جهت‌پذیری منجر به متمرکز شدن انرژی لرزه‌ای در یک پالس بزرگ و با دامنه بالا، عمدتا در جهت عمود بر امتداد گسل (Fault-Normal) می‌شود که در نتیجه آن، ارزیابی دقیق پاسخ سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

کنترل فازی طراحی شده

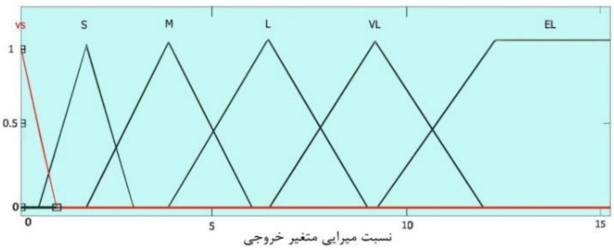
در این تحقیق، برای بررسی تأثیر شدت زمین‌لرزه بر عملکرد میراگرهای مایع قابل تنظیم در کنترل ارتعاشات سازه‌ها، از منطق فازی بهره گرفته شده است. سیستم‌های فازی با توانایی شبیه‌سازی رفتارهای پیچیده و غیرخطی سیستم‌های مکانیکی مانند میراگرهای مایع، ابزار کارآمدی برای کنترل هوشمند این سیستم‌ها محسوب می‌شوند. در این سیستم‌ها، پارامترهای فیزیکی ورودی مانند جابه‌جایی و سرعت سازه به مفاهیم زبانی فازی مانند «جابه‌جایی کم»، «سرعت زیاد» تبدیل شده و سپس با استفاده از قواعد فازی، تصمیم‌گیری در مورد زاویه پره‌های میراگر اتخاذ می‌شود. به عبارت دیگر، سیستم فازی به صورت هوشمند، زاویه پره‌های میراگر را تنظیم می‌کند تا ارتعاشات سازه به حداقل برسد. در مطالعه حاضر، برای هر یک از ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، توابع عضویت مثلثی (هشت تابع عضویت ورودی و شش تابع عضویت خروجی) تعریف شده است تا بتوانیم میزان تعلق هر پارامتر به مفاهیم زبانی را مشخص کنیم. شکل (۲) نمونه‌ای از این توابع عضویت را برای ورودی نشان می‌دهد.



شکل ۲ نمایی از توابع عضویت تعریف شده برای ورودی‌ها [18]

هر یک از این توابع، یک محدوده مشخص از مقادیر ورودی را نشان می‌دهد. برای مثال، تابع عضویت "PVL" بیانگر مقادیر ورودی بسیار بزرگ و مثبت است. برای نام‌گذاری این توابع، از حروف اختصاری استفاده شده است؛ مثلا "P" برای مثبت، "N" برای منفی، "S" برای کوچک، "M" برای متوسط و "L" برای بزرگ. همچنین، "VL" نشان دهنده مقدار خیلی بزرگ است. بنابراین، ترکیبی مانند "PVL" به معنای «بسیار مثبت و بزرگ» است. برای تعیین میزان همپوشانی بین توابع عضویت مجاور،

ضریب همپوشانی ۰/۵ به پیشنهاد تنگ و همکاران [22] در نظر گرفته شده است. این ضریب نشان می‌دهد که تا چه اندازه توابع عضویت با هم اشتراک دارند. انتخاب مقدار مناسب برای این ضریب، نقشی کلیدی در کارایی سیستم فازی ایفا می‌کند. همپوشانی بیش از حد توابع عضویت منجر به کاهش دقت سیستم می‌شود و همپوشانی کم، توانایی سیستم را در مدیریت حالات مبهم کاهش می‌دهد. همان طور که در شکل (۳) نمایش داده شده است، برای تعیین خروجی سیستم (یعنی زاویه پره‌های میراگر) از شش تابع عضویت مثلثی استفاده شده است. این توابع، با همپوشانی ۰/۵، دامنه‌های مختلفی از زوایای پره‌ها را تعریف می‌کنند که هر کدام نشان دهنده یک سطح مشخص از میرایی هستند.



شکل۳ نمایی از توابع عضویت تعریف شده برای خروجی‌ها [18]

به منظور دستیابی به کنترل دقیق سیستم، ۶۴ قاعده فازی بر اساس روابط بین ورودی‌ها و خروجی سیستم تدوین شده است. این قواعد که به شکل «اگر ـ آنگاه» بیان می‌شوند و در جدول (۲) آورده شده‌اند، رفتار سیستم را در شرایط مختلف مدل‌سازی می‌کنند؛ برای مثال، یکی از این قواعد به صورت زیر است: « در صورتی که جابه‌جایی "L" زیاد و سرعت "S" کم باشد، زاویه پره‌ها باید به مقدار "L" زیادی افزایش یابد.» در طراحی این قواعد، از منطق کنترل بنگ ـ بنگ (Bang-Bang) استفاده شده است که در آن، کنترلگر به صورت حداکثری در یک جهت یا جهت مخالف عمل می‌کند. این رویکرد به دلیل سادگی و پاسخ سریع، برای سیستم‌هایی که نیاز به واکنش سریع دارند، مناسب است. علایم در این جدول عبارتند از مقادیر ورودی‌های فازی جابه‌جایی و سرعت از قبیل NVL «منفی بسیار بزرگ»، NL «منفی بزرگ»، NM «منفی متوسط»، NS «منفی کوچک»، PS «مثبت کوچک»، PM «مثبت متوسط»، PL «مثبت بزرگ» و PVL «مثبت بسیار بزرگ». علایم خروجی‌های فازی نیز عبارتند از VS «خیلی کوچک»، S «کم»، M «متوسط»، L «زیاد»، VL «خیلی زیاد» و EL «خیلی خیلی زیاد».

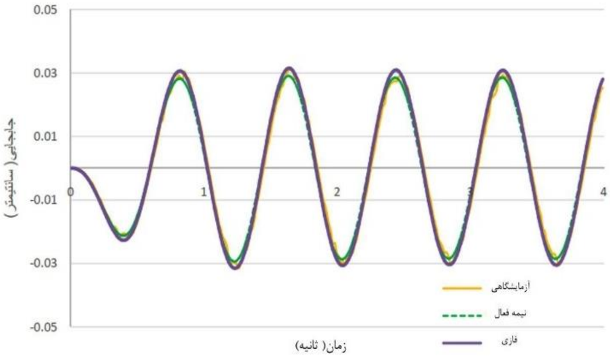
جدول ۲ جدول قواعد فازی برای طراحی کنترل [18]

جابه‌جایی سازه	سرعت							
	NVL	NL	NM	NS	PS	PM	PL	PVL
NVL	EL	EL	EL	VL	S	S	VL	EL
NL	EL	EL	EL	L	M	S	L	VL
NM	VL	L	M	S	S	S	S	L
NS	L	M	S	VS	VS	S	M	L
PS	L	M	S	VS	VS	S	M	L
PM	L	S	S	S	S	M	L	VL
PL	VL	L	S	M	L	EL	EL	EL
PVL	EL	VL	S	S	VL	EL	EL	EL

با توجه به خروجی کنترلگر فازی، کنترلگر فازی با تنظیم دقیق زاویه پره‌ها، میزان میرایی سازه را به سطح مطلوب می‌رساند. برای حفاظت از سیستم، تغییرات زاویه پره‌ها به صورت تدریجی و با محدودیت ۲۱ درجه در هر گام زمانی اعمال می‌شود.

صحت‌سنجی کنترل فازی طراحی شده

برای صحت‌سنجی عملکرد سیستم کنترلگر فازی که در نرم‌افزار متلب (Matlab) پیاده‌سازی شده از نتایج تست‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط عنایتی و زهرایی در آزمایشگاه میز لرزان دانشگاه تهران استفاده شده است [24]. با اعمال نیروی نوسانی با فرکانس ۱/۲۵ هرتز و شتاب معادل ۰/۱ شتاب زمین، زاویه بهینه پره‌ها ۷۲ درجه است. بنابراین برای صحت‌سنجی کنترلر فازی و الگوریتم نیمه‌فعال بهینه خطی یک تحریک با فرکانس ۱/۲۵ هرتز و شتاب معادل ۰/۱ شتاب زمین به سازه اعمال گردید و همان گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد سیستم در کمترین زمان ممکن به این زاویه می‌رسد، که این امر با توجه تطابق پاسخ جابه‌جایی در شکل (۴) مورد تأیید است.



شکل ۴ نتایج پاسخ جابه‌جایی سازه مدل شده یک درجه آزادی به منظور صحت‌سنجی

نتایج

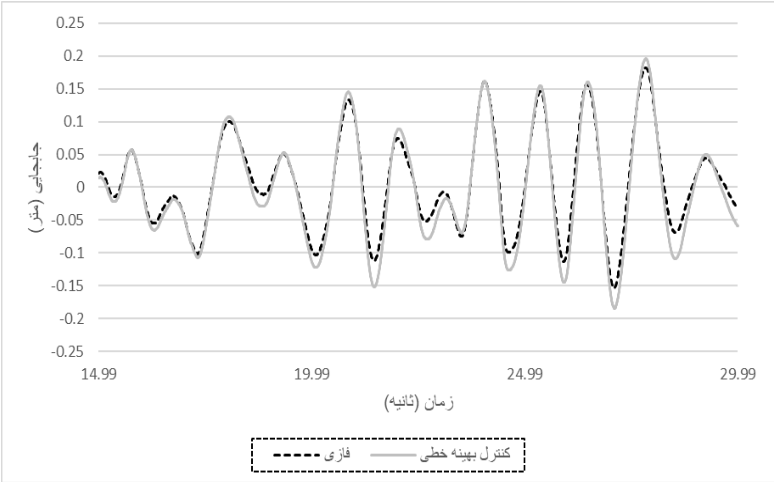
در این پژوهش، به بررسی تأثیر تغییرات پارامتر بیشینه شتاب زمین بر عملکرد سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال لرزه‌ای پرداخته شد. در این راستا، شتاب‌نگاشت‌های زلزله با اعمال ضرایب مقیاس کننده مبتنی بر بیشینه شتاب زمین در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ شتاب زمین، به صورت گام به گام اصلاح شدند. این فرایند، ارزیابی جامع‌تری از تأثیر سطوح مختلف شدت زلزله بر پاسخ دینامیکی سازه‌های مجهز به سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال را امکان‌پذیر کرد.

برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی سازه، یک سیستم تک درجه آزادی در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد. پارامترهای این مدل شامل جرم، سختی، میرایی سازه و مشخصات میراگر مایع تنظیم شونده تحت کنترل فازی بودند. با اعمال شتاب‌نگاشت‌های مقیاس‌بندی شده به این مدل، پاسخ‌های دینامیکی سازه، شامل جابه‌جایی و شتاب در بام سازه، تحت سه سناریوی کنترل فازی، کنترل‌کننده بهینه خطی (LQR) (Linear quadratic regulator) و سیستم غیرفعال محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند.

نتایج حاصل از تحلیل پاسخ‌های سازه تحت رکورد زلزله حوزه نزدیک ـ گسل ناهانی در شکل (۵) نشان می‌دهد که کنترل فازی منجر به کاهش جابه‌جایی سازه در بازه زمانی ۱۵ تا ۳۰ ثانیه شده است. این کاهش به ویژه در پیک پاسخ‌ها محسوس است. این بهبود عملکرد ناشی از مکانیزم هوشمند کنترل فازی است که با چرخش بهینه پره‌های میراگر، تلاطم سیال را افزایش داده و در نتیجه انرژی ورودی به سازه را جذب می‌کند. تنظیم پیوسته ضریب میرایی توسط کنترلگر فازی نیز به فراهم آوردن بهینه‌ترین حالت میرایی برای سازه کمک می‌کند.

داده‌های ارائه شده در جداول (۳) و (۴) نیز مؤید این مطلب است که سیستم کنترل فازی به طور قابل مؤثری در کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه، به ویژه شتاب سازه، نسبت به سیستم کنترل کننده بهینه خطی و کنترل غیرفعال بهینه‌تر عمل کرده است. این بهبود عملکرد در هر دو پاسخ حداکثر شتاب و جذر مجموع مربعات (RMS) (Square root of the sum of the squares) جابه‌جایی و شتاب مشاهده می‌شود. کاهش شتاب سازه علاوه بر افزایش ایمنی، به بهبود آسایش ساکنان نیز کمک می‌کند. ویژگی بارز سیستم کنترل فازی طراحی شده، کاهش شتاب نه تنها در نقاط بیشینه پاسخ، بلکه در کل بازه زمانی تحریک است. این ویژگی از ماهیت تطبیقی و انعطاف‌پذیر کنترلگر فازی نشئت می‌گیرد، که با استفاده از قوانین منطق فازی، ضریب میرایی را به صورت آنلاین و متناسب با تغییرات غیرخطی سیستم بهینه می‌کند. در مقابل، کنترل بهینه خطی به دلیل وابستگی به مدل دقیق سازه، نیاز به حل معادلات پیچیده، و تأخیر محاسباتی، در شرایط دینامیکی متغیر با محدودیت مواجه است.

در این بخش، به منظور انجام یک تحلیل جامع از عملکرد نسبی سیستم‌های کنترل فازی، بهینه خطی و غیرفعال، مجموعه‌ای شامل ۱۲ پارامتر کمی تعریف گردید. این پارامترها که با نمادهای R1 تا R12 مشخص شده‌اند، به منظور ارزیابی درصد بهبود در پارامترهای پاسخ دینامیکی کلیدی سازه، از جمله شتاب، جابه‌جایی و برش پایه، در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، از آزمون واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) با بهره‌گیری از نرم‌افزار گراف‌پد پریزم (GraphPad Prism) استفاده شده است. جدول (۵) تعاریف دقیق این شاخص‌های عملکرد را ارائه می‌دهد.



شکل ۵ بزرگ‌نمایی تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی سازه در ثانیه ۱۵ الی ۳۰ تحت زلزله حوزه نزدیک ـ گسل ناهانی در کنترل فازی و بهینه خطی

جدول ۳ درصد بهبود پاسخ شتاب سازه تحت زلزله پالس حوزه نزدیک ـ گسل کوکائلی در کنترل فازی و کنترل بهینه خطی

	شتاب فازی (m/s^2)	شتاب غیرفعال (m/s^2)	درصد بهبود (٪)
حداکثر	۲/۴۴۹۳	۲/۴۶۸۱	۰/۷۶
جذر مجموع مربعات	۰/۲۹۲۰۲۵	۰/۳۰۰۵۸۴	۲/۸۵

جدول ۴ درصد بهبود پاسخ جابه‌جایی سازه تحت زلزله پالس حوزه نزدیک ـ گسل کوکائلی در کنترل فازی و کنترل غیرفعال

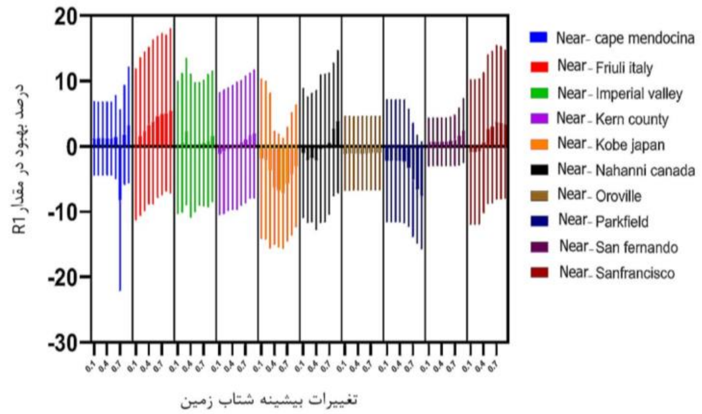
	جابه‌جایی فازی (m)	جابه‌جایی غیرفعال (m)	درصد بهبود (٪)
حداکثر	۰/۰۴۹۶	۰/۰۵۰۵	۱/۸۶
جذر مجموع مربعات	۰/۰۰۹۸۹۷	۰/۰۰۹۹۰۰	۰/۰۳

جدول ۵ تعریف پارامترهای R1 تا R12

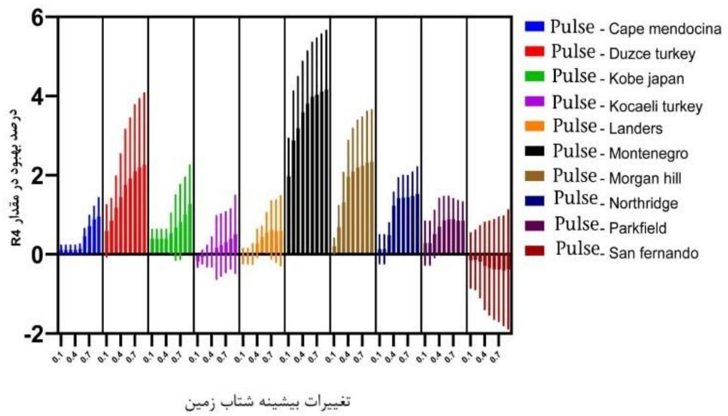
نام پارامتر	تعریف بر مبنای درصد بهبود
R1	بیشینه جابه‌جایی بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R2	بیشینه جابه‌جایی بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال
R3	بیشینه شتاب بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R4	بیشینه شتاب بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال
R5	بیشینه برش پایه سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R6	بیشینه برش پایه سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال
R7	جذرمجموع مربعات جابه‌جایی بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R8	جذرمجموع مربعات جابه‌جایی بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال
R9	جذرمجموع مربعات شتاب بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R10	جذرمجموع مربعات شتاب بام سازه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال
R11	جذرمجموع مربعات برش پایه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی
R12	جذرمجموع مربعات برش پایه در کنترل فازی نسبت به کنترل غیرفعال

نتایج مربوط به کاهش بیشینه جابه‌جایی بام سازه (شاخص R1) تحت رکوردهای زلزله حوزه نزدیک ــ گسل در شکل (۶) نشان می‌دهد، که با افزایش PGA، بهبود عملکرد سیستم کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی عموما روند صعودی دارد. این امر ناشی از توانایی سیستم در انطباق دینامیکی با تغییرات پاسخ سازه تحت شدت‌های مختلف زلزله است.

شکل (۷) برتری عمومی کنترل فازی بر سیستم غیرفعال را در کاهش مقدار بیشینه شتاب نشان می‌دهد. در رکوردهایی مانند "Montenegro"و"Duzce turkey"، درصد بهبود R4 به وضوح بالاتر است (به ترتیب در حدود ۴٪ تا ۵٫۵٪ و ۲٪ تا ۴٪). این بهبود به همپوشانی مطلوب ویژگی‌های فرکانسی پالس غالب این زلزله‌ها با محدوده عملکرد بهینه میراگر مایع تنظیم شونده و قوانین فازی آن اشاره دارد. این رکوردهای دارای پالس‌های مشخص سرعت یا جابه‌جایی هستند که سیستم کنترل فازی می‌تواند به طور مؤثرتری به آن‌ها واکنش نشان دهد. در رکوردهایی مانند "Cape Mendocina" و"Kobe Japan"، درصد بهبود در محدوده ۰٫۵٪ تا ۲٪ قرار دارد. این تفاوت در کارایی می‌تواند به تغییرات در محتوای فرکانسی، مدت زمان پالس، یا شکل پالس در این زلزله‌ها نسبت داده شود که ممکن است بهینه‌سازی عملکرد کنترل فازی را نسبت به رکوردهای ذکر شده در بالا کمی دشوارتر کند. در برخی رکوردهای خاص نظیر "San fernando"، به ویژه در بیشینه شتاب‌های بالاتر (مثلا g۰/۷ به بعد)، شاخص R4 مقادیر منفی (مثلا حدود -۱٪ تا -۲٪) را نشان می‌دهد. این پدیده می‌تواند ناشی از عواملی مانند تشدید برخی مودهای ارتعاشی در برخی فرکانس‌ها و شدت‌های خاص، اشباع عملکرد میراگر یا کنترلگر در شدت‌های بسیار بالا (بیشینه شتاب های نزدیک به g۰/۹) و اثرات غیرخطی پیچیده در زلزله‌های شدید باشد. این سیستم، به دلیل قابلیت انطباق خودکار، در اکثر سناریوها عملکرد بهبود یافته‌ای را ارائه می‌دهد و با افزایش شدت زلزله، کارایی آن نیز افزایش می‌یابد.



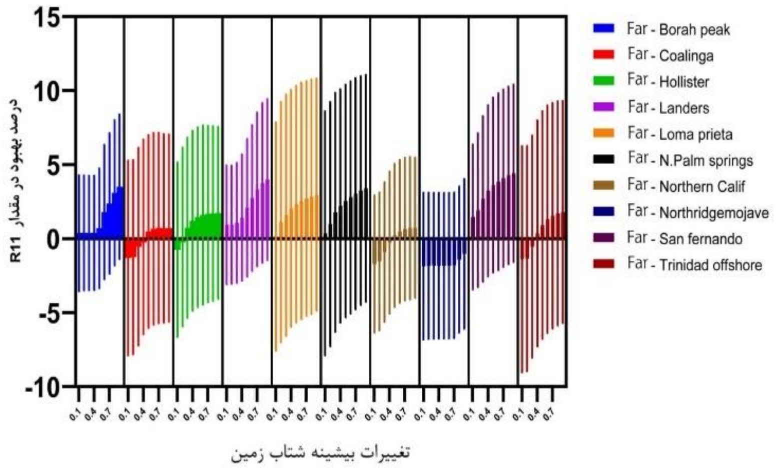
شکل ۶ اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر پارامتر R1 در زلزله‌های غیر پالس حوزه نزدیک ـ گسل



شکل ۷ اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر پارامتر R4 در زلزله‌های پالس حوزه نزدیک ـ گسل

شکل (۸) درصد بهبود شاخص R11 (جذر مجموع مربعات برش پایه در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی) را تحت رکوردهای مختلف زلزله‌های حوزه دور ـ گسل نشان می‌دهد. کنترل فازی در مواجهه با تحریکات لرزه‌ای غیرخطی و سطوح بالای بیشینه شتاب عملکردی پایدارتر و مؤثرتر نسبت به کنترل بهینه خطی نشان می‌دهد که ناشی از توانایی تطابق ذاتی کنترل فازی در مواجهه با تغییرات دینامیکی لحظه‌ای سیستم است. این موضوع به طور خاص در سطوح بیشینه شتاب g۰/۵ به بالا به صورت منسجم در اغلب نواحی دیده می‌شود. در مقابل در سطوح پایین‌تر بیشینه شتاب که پاسخ سازه عمدتا در ناحیه خطی است، کنترل بهینه خطی به واسطه تنظیم بهینه پره‌ها بر مبنای مدل دقیق خطی، در برخی از رکوردها نظیر "Trinidad offshore" و"Northen calif"، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد که علت آن خطای ناشی از تخمین‌های فازی در شرایط کم‌تحریک (بیشینه شتاب‌های پایین‌تر) است.

بررسی تأثیر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر کاهش بیشینه جابه‌جایی بام سازه در کنترل فازی نسبت به حالت غیرفعال در رکوردهای زلزله حوزه دور ـ گسل (R2) در جدول (۶) نشان می‌دهد، مقادیر این شاخص در بیشتر موارد بین صفر و یک است و حاکی از کاهش جابه‌جایی توسط کنترل فازی است. همچنین در شتاب‌های زیاد، با افزایش انرژی ورودی به سازه، سیستم کنترل فازی با بهینه‌سازی توزیع و جریان سیال در میراگر مایع، عملکرد بهتری در جذب و میرایی انرژی ارتعاشی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۸ اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر پارامتر R11 در زلزله‌های حوزه دور ـ گسل

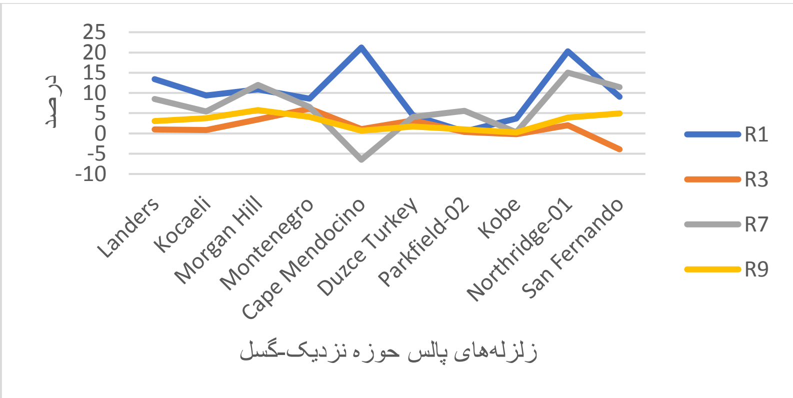
جدول ۶ اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر پارامتر R2 در زلزله‌های حوزه دور ـ گسل

	انحراف معیار (٪)	میانگین (٪)	حداکثر (٪)	میانه (٪)	حداقل (٪)
Borah peak	۲/۹۷	۲/۸۲	۸/۵۶	۲/۱۵	-۰/۶۱
Hollister	۱/۷	۳/۰۲	۵/۷۳	۳/۹۴	-۰/۸
Landers	۴/۴۱	۴/۰۱	۹/۳۳	۴/۹۳	-۲/۸۴
Loma prieta	۳/۵۲	۲/۰۸	۸/۷۸	۱/۶۵	-۲/۴
Northern Calif	۱/۸۲	۰/۷۱	۴/۱۶	۰/۷۸	-۲/۲۹
Northridge mojave	۳/۵	۲/۸۲	۶/۷۱	۴/۳۵	-۳/۳۲
San Fernando	۲/۹۷	۲/۸۲	۸/۵۶	۲/۱۵	-۰/۶۱

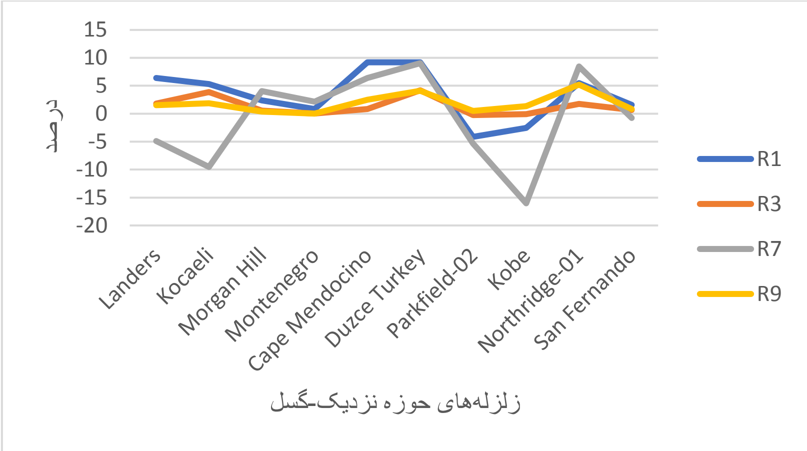
شکل‌های (۹) تا (۱۱) روند کاهش پاسخ جابه‌جایی و شتاب در رکوردهای مختلف را نشان می‌دهد. در این نمودارها، عملکرد سیستم فازی پیشنهادی با کنترل بهینه خطی در شتاب بیشینه زمین ثابت برابر ۰/۸ برای رکوردهای زلزله در منابع مختلف مقایسه شده است. مقایسه کلی عملکرد سیستم‌ها در شکل (۹) نشان می‌دهد که کنترل فازی با بهره‌گیری از مکانیزم تطبیقی مبتنی بر قوانین اگر ـ آنگاه و تنظیم آنلاین ضریب میرایی، بهبود قابل توجهی در کاهش پاسخ‌های سازه ایجاد می‌کند. این بهبود در شاخص‌های مختلفی از جمله بیشینه جابه‌جایی بام (R1)، بیشینه شتاب بام (R3)، جذر مجموع مربعات جابه‌جایی (R7) و شتاب بام (R9) قابل مشاهده است. به عنوان نمونه، بهبودی معادل ۲۰ درصد در شاخص بیشینه جابه‌جایی بام و ۱۵ درصد در شاخص جذر مجموع مربعات جابه‌جایی (R7) برای رکورد نورثریج حاصل کرده است. این عملکرد موفق ناشی از تطابق پویای سیستم فازی با پالس‌های سرعت با دامنه ۸۰ سانتی‌متر بر ثانیه و مدت زمان ۲ـ۱ ثانیه در این رکورد است که موجب تحریک رفتار غیرخطی سازه می‌شود. در مقابل، در رکورد کوبه با شتاب اوج برابر ۰/۸ شتاب زمین و محتوای فرکانسی گسترده (۰/۵ تا ۱۰ هرتز)، بهبود شاخص‌ها به ۵ـ۳ درصد محدود شد. این امر نشان دهنده تأثیر مؤلفه‌های فرکانسی بالا بر کاهش کارایی قوانین فازی در شناسایی الگوی غالب ارتعاش است. در مقابل، تأخیر زمانی در محاسبات کنترلگر بهینه خطی می‌تواند بر عملکرد آن تأثیر منفی بگذارد. این موضوع به ویژه در زلزله‌های حوزه نزدیک ـ گسل که نیاز به واکنش سریع سیستم کنترل دارند، می تواند مشکل‌ساز باشد.

شکل (۱۰) حاکی از آن است که در برخی از زلزله‌های با منشأ نزدیک به گسل، سیستم‌های کنترل فازی به طور مؤثری عملکرد لرزه‌ای را بهبود بخشیده‌اند. این بهبود به ویژه در پارامترهای مربوط به جذر مجموع مربعات جابه‌جایی و شتاب بام (R7 و R9) مشهود و پیوسته است؛ به عنوان مثال بهبود عملکرد تا ۱۰ درصد در شاخص‌های R7 و R9 را برای رکوردهای کپ مندوکینو (با پالس پیش‌رونده به اندازه ۱/۲ متر) و دوزجه ترکیه (دارای شتاب عمودی برابر ۰،۶ شتاب زمین) از خود نشان داده‌اند. با این حال، در برخی دیگر از زلزله‌ها، میزان بهبود کمتر است و حتی در مواردی، عملکرد سیستم کنترل خطی بهتر از سیستم کنترل فازی بوده است؛ به عنوان مثال در زلزله لندرز با مدت تحریک طولانی (۴۰ ثانیه)، سیستم کنترل فازی در شاخص R7 عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سیستم کنترل بهینه خطی داشته است که علت آن بهینه‌سازی مبتنی بر مدل خطی سازه در این شرایط است.

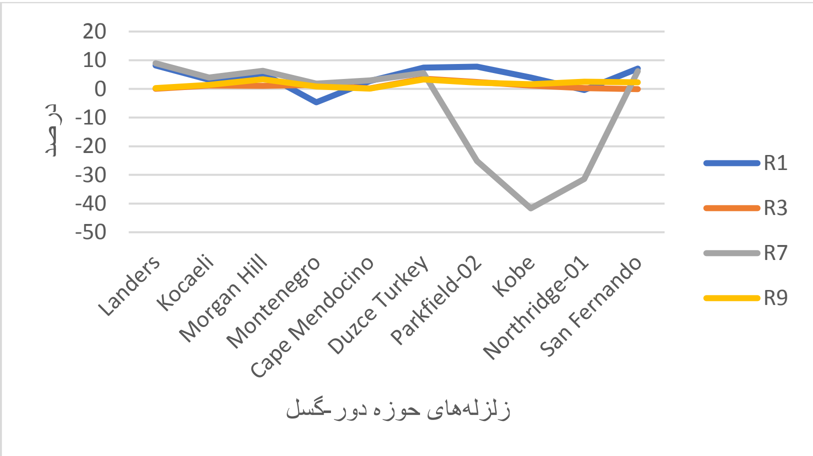
شکل (۱۱) بیانگر آن است که سیستم کنترل فازی در برخی از شاخص‌های عملکرد، بهبودهایی را نسبت به سیستم کنترل بهینه خطی نشان می‌دهد. با این حال، در تعداد اندکی از رکوردها، در شاخص R7 (جذر مجموع مربعات جابه‌جایی بام سازه)، عملکرد سیستم کنترل فازی در زلزله‌های حوزه دور ـ گسل به طور قابل توجهی ضعیف‌تر از سیستم کنترل بهینه خطی است. این چالش از انباشت خطای تطبیق (adaptation drift) در سیستم فازی طی بازه‌های زمانی طولانی (بیش از ۶۰ ثانیه) ناشی می‌شود. با این وجود، در سایر شاخص‌های عملکرد مانند R1 و R9، سیستم کنترل فازی همچنان بهبودهایی را نسبت به سیستم کنترل بهینه خطی نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که سیستم کنترل فازی همچنان می‌تواند در کاهش جابه‌جایی سازه و بهبود پایداری آن در برابر زلزله‌های حوزه دور ـ گسل نیز مؤثر باشد.



شکل ۹ درصد تغییرات پارامترهای R1، R3، R7 و R9 در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی در زلزله‌های پالس حوزه نزدیک ـ گسل



شکل ۱۰ درصد تغییرات پارامترهای R1، R3، R7 و R9 در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی در زلزله‌های حوزه نزدیک ـ گسل



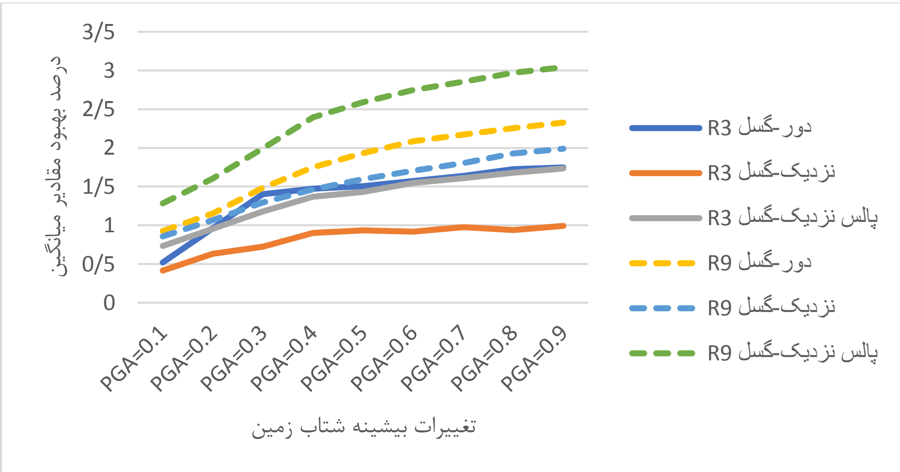
شکل ۱۱ درصد تغییرات پارامترهای R1، R3، R7 و R9 در کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی در زلزله‌های حوزه دور ـ گسل

نتایج تجمیعی شکل‌های (۹) تا (۱۱) نشان می‌دهد عملکرد سیستم کنترل فازی به طور معناداری تحت تأثیر ماهیت منشأ زلزله قرار دارد. در زلزله‌های پالس حوزه نزدیک ـ گسل مانند کوکائلی (با پالس شبه‌ایستای ۱٫۵ ثانیه‌ای و محتوای فرکانسی ۰/۵ـ۲ هرتز)، این سیستم با کاهش تا ۲۰ درصد در شاخص R1 (بیشینه جابه‌جایی بام) و تا ۱۵ درصد در جذر مجموع مربعات جابه‌جایی (R7)، حداکثر کارایی خود را نشان داد. این موفقیت ناشی از همپوشانی باند فرکانسی سیستم فازی (۰/۵ـ۲ هرتز) با مؤلفه‌های غالب پالس‌های نزدیک ـ گسل و توانایی آن در تنظیم میرایی طی ۰/۱ ثانیه برای مقابله با نیروهای ضربه‌ای (Impulsive Forces) تا ۱/۲ برابر شتاب زمین است. در مقابل، در زلزله‌های غیرپالس حوزه نزدیک ـ گسل (با شتاب یکنواخت و فرکانس غالب ۵ـ۱ هرتز)، کاهش شاخص‌ها به ۱۰ درصد برای R1 و ۵ درصد برای R3 محدود می‌شود که به علت آن فقدان مؤلفه‌های انرژی متمرکز برای فعال‌سازی بهینه قوانین فازی است. در زلزله‌های حوزه دور ـ گسل نیز (با فرکانس غالب ۰/۱ـ۰/۰۵ هرتز و مدت تحریک ۶۰+ ثانیه)، اگر چه سیستم فازی در شاخص R1کاهش ۱۰ درصدی و در R9 کاهش ۳ درصدی ایجاد می‌کند، اما در شاخص R7 در تعداد کمی از رکوردها با افزایش خطا نسبت به کنترل بهینه خطی مواجه است.

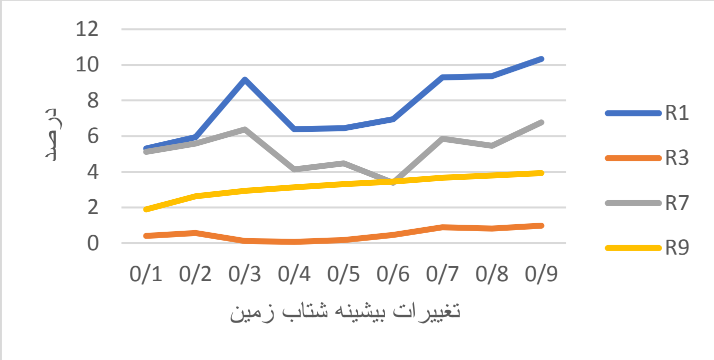
شکل (۱۲) تأثیر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر درصد میانگین بهبود شاخص‌های R3 (بیشینه شتاب بام) و R9 (جذر مجموع مربعات شتاب بام) را در مقایسه با کنترل بهینه خطی و تحت انواع زلزله (پالس حوزه نزدیک ـ گسل، حوزه نزدیک ـ

گسل و حوزه دور ـ گسل) در پریود ۱/۳ ثانیه به تصویر می‌کشد. نمودار به وضوح برتری سیستم کنترل فازی را در کاهش هر دو شاخص R3 و R9 نسبت به کنترل بهینه خطی در تمام سناریوهای زلزله نشان می‌دهد که بیانگر توانمندی ذاتی کنترل فازی در مدیریت پاسخ‌های دینامیکی پیچیده سازه است. بالاترین درصد بهبود در هر دو شاخص R3 و R9 مربوط به زلزله‌های پالس حوزه نزدیک ـ گسل (خط سبز) است. ماهیت این زلزله‌ها با پالس‌های سرعت با دامنه بزرگ، موجب تحریک شدید رفتار غیرخطی سازه می‌شوند و کنترل فازی به دلیل قابلیت تنظیم آنلاین میرایی و تطبیق با تغییرات ناگهانی، در این شرایط بهینه‌ترین جذب انرژی را فراهم می‌آورد. بهبود عملکرد در دسته‌های زلزله‌های حوزه نزدیک ـ گسل (خط آبی) و حوزه دور ـ گسل (خط نارنجی) نیز مشهود است، اما مقادیر آن به ترتیب کاهشی است. این تفاوت می‌تواند ناشی از ویژگی‌های فرکانسی متفاوت و عدم وجود پالس‌های غالب مشخص در زلزله‌های غیرپالس باشد که می‌تواند منجر به فعال‌سازی کمتر بهینه قوانین فازی شود. با این حال، حتی در زلزله‌های دور ـ گسل، سیستم فازی همچنان بر کنترل بهینه خطی ارجحیت دارد. یک نکته حائز اهمیت، افزایش درصد بهبود با افزایش بیشینه شتاب در تمام سناریوهای زلزله است. این روند صعودی، انطباق‌پذیری بالای سیستم فازی در مواجهه با تحریکات لرزه‌ای شدید را تأیید می‌کند. همچنین شاخص R9 (جذر مجموع مربعات شتاب) به طور کلی درصد بهبود بالاتری نسبت به R3 (بیشینه شتاب) نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد سیستم پیشنهادی علاوه بر کاهش پیک‌های شتاب (ایمنی سازه)، کاهش R9 نشان‌دهنده میرایی مؤثرتر و پایدارتر در طول زمان تحریک است که به بهبود آسایش ساکنان و کاهش آسیب‌های غیرسازه‌ای کمک می‌کند.

شکل (۱۳) تأثیر تغییرات بیشینه شتاب را بر درصد بهبود عملکرد پارامترهای R1، R3، R7 و R9 تحت کنترل فازی در مقایسه با کنترل بهینه خطی در زلزله پالس حوزه نزدیک ـ گسل کوکائلی نشان می‌دهد. همان طور که در نمودار مشخص است، با افزایش بیشینه شتاب زمین، شاهد بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی (کنترل فازی) هستیم. این بهبود در مقادیر جذر مجموع مربعات شتاب و جابه‌جایی به طور پیوسته با افزایش بیشینه شتاب مشاهده می‌شود. به طور خاص، در بیشینه شتاب‌های پایین (مانند ۰/۱ تا ۰/۳ شتاب زمین)، کنترل فازی بهبود نسبتا کمی (کمتر از ۲ درصد) در مقایسه با کنترل بهینه خطی ارائه می‌دهد. با این حال، با افزایش بیشینه شتاب، این بهبود چشم‌گیرتر می‌شود؛ برای مثال در بیشینه شتاب زمین برابر با ۰/۹، مقدار بیشینه جابه‌جایی با استفاده از کنترل فازی بیش از ۱۰ درصد نسبت به کنترل بهینه خطی کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که سیستم کنترل فازی با افزایش شدت زلزله، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد و قادر به کاهش مؤثرتر پاسخ‌های سازه است. این روند در سایر رکوردها نیز مشاهده شد.



شکل ۱۲ ارزیابی اثر کنترل فازی در مقایسه با کنترل بهینه خطی بر بیشینه و جذر مجموع مربعات شتاب تحت تأثیر انواع زلزله در پریود ۱/۳ ثانیه



شکل ۱۳ اثر تغییرات بیشینه شتاب زمین بر بهبود عملکرد کنترل فازی در زلزله پالس حوزه نزدیک ـ گسل کوکائلی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد میراگر مایع تنظیم شونده با پره‌های قابل چرخش تحت کنترل فازی در کاهش پاسخ دینامیکی یک سیستم تک درجه آزادی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. به منظور شبیه‌سازی شرایط مختلف زلزله، سازه مجهز به میراگر تحت تأثیر طیف گسترده‌ای از شتاب‌نگاشت‌های زلزله با منشأهای متفاوت (حوزه دور ـ گسل، نزدیک ـ گسل و پالس نزدیک ـ گسل) قرار گرفت. با اعمال مقیاس‌بندی بر روی شتاب‌نگاشت‌ها در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ برابر بیشینه شتاب زمین (PGA)، تأثیر شدت زمین‌لرزه بر کارایی سیستم کنترل فازی ارزیابی شد. در نهایت، نتایج حاصل از کنترل فازی با دو روش مرسوم کنترل بهینه خطی (LQR) و کنترل غیرفعال، با استفاده از دوازده شاخص عملکردی (R1-R12) و تحلیل آماری مبتنی بر آزمون واریانس دوسویه (Two-way ANOVA) مقایسه گردید.

تحلیل نتایج نشان داد که به‌کارگیری سیستم کنترل فازی در میراگر مایع، منجر به کاهش محسوس پاسخ‌های دینامیکی جابه‌جایی و شتاب سازه در اکثر سناریوهای زلزله نسبت به روش‌های کنترل بهینه خطی و غیرفعال می‌شود. با افزایش بیشینه شتاب از ۰/۱ شتاب زمین به ۰/۹ شتاب زمین، عملکرد سیستم کنترل فازی به‌طور پیوسته بهبود یافت. در سطوح پایین بیشینه شتاب زمین (۰/۱ تا ۰/۳ شتاب زمین)، بهبود عملکرد نسبت به کنترل بهینه خطی کمتر از ۲ درصد بود؛ اما در سطوح بالاتر (۰/۶ تا ۰/۹ شتاب زمین)، کاهش بیشینه جابه‌جایی بام تا ۱۰ درصد و کاهش جذر مجموع مربعات شتاب تا ۵ درصد مشاهده شد. برای نمونه، در رکورد کوکائلی (با بیشینه شتاب زمین برابر ۰/۹ شتاب زمین)، کاهش ۱۰ درصدی در بیشینه جابه‌جایی نسبت به کنترل بهینه خطی ثبت گردید. همچنین در رکورد کوبه با محتوای فرکانسی گسترده (۰/۵ تا ۱۰ هرتز)، سیستم کنترل فازی به دلیل محدودیت در شناسایی الگوی غالب ارتعاش، بهبود شاخص‌ها را به ۳ تا ۵ درصد محدود کرد.

با این حال، در زلزله‌های نزدیک به گسل، علی‌رغم بهبود قابل توجه در برخی پاسخ‌ها، در تعدادی از موارد افزایش اندک جابه‌جایی و پاسخ طیفی مشاهده شد. در زلزله‌های دور ـ گسل از گسل نیز، به استثنای موارد خاصی در شاخص‌های R1، R2، R3، R7 و تمامی رکوردهای شاخص R8 که عملکرد کنترل فازی کمتر مطلوب بود، در سایر شاخص‌های عملکردی، این روش همطراز یا حتی برتر از روش‌های دیگر عمل کرد. برای مثال، در شاخص R10، کاهش میانگین جذر مجموع مربعات شتاب در محدوده ۲ تا ۵ درصد ثبت شد. بررسی شاخص R12 نیز نشان داد در برخی رکوردها مانند لندرز با مدت تحریک طولانی (۴۰ ثانیه)، کاهش جذر مجموع مربعات برش پایه (میانگین ۳/۱۴ درصد و حداکثر ۴/۸۸ درصد) حاصل شده است. با این حال، در همین رکورد، سیستم کنترل فازی به دلیل انباشت خطای تطبیقی در شاخص R7، عملکردی ۵ درصد ضعیف‌تر نسبت به کنترل بهینه خطی نشان داد. در شرایطی مانند زلزله‌های پالس حوزه نزدیک ـ گسل (مانند کوکائلی) که نیازمند واکنش سریع هستند، کنترل فازی به دلیل عدم وابستگی به مدل خطی و محاسبات آنلاین، کاهش ۲۰ درصدی در بیشینه جابه‌جایی (R1) ایجاد کرد؛ در حالی که تأخیر محاسباتی کنترل بهینه خطی منجر به عملکرد ضعیف‌تر آن شد.

کنترل فازی در زلزله‌های پالس حوزه نزدیک ـ گسل (مانند زلزله کوکائلی) بهترین عملکرد را داشته است و کاهشی حدود

۲۰ درصدی در جابه‌جایی بام سازه مشاهده شد. این بهبود ناشی از توانایی سیستم فازی در تطبیق سریع با پالس‌های قوی و کوتاه‌مدت این نوع زلزله‌ها است. در زلزله‌های حوزه دور ـ گسل، کنترل فازی در اکثر موارد عملکردی برابر یا بهتر از روش‌های دیگر داشت، اما در برخی موارد (مانند رکورد لندرز) به دلیل انباشت خطای تطبیقی، عملکرد آن ضعیف‌تر بود. در زلزله‌های غیرپالس حوزه نزدیک ـ گسل، بهبود عملکرد کنترل فازی نسبت به کنترل بهینه خطی محدودتر بود (حدود ۵ـ۱۰ درصد). در نهایت کنترل فازی در تمام انواع زلزله‌ها مؤثر است، اما میزان بهبود آن بسته به نوع زلزله متفاوت است. بهترین عملکرد در زلزله‌های پالس حوزه نزدیک ـ گسل مشاهده شد.

در مجموع، نتایج این پژوهش پتانسیل بالای سیستم‌های کنترل فازی را در ارتقای عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، به ویژه در زلزله‌های شدید (با بیشینه شتاب زمین بزرگ‌تر از ۰/۶ شتاب زمین) و پالس حوزه نزدیک ـ گسل (مانند کوکائلی و کپ مندوکینو) با کاهش تا ۲۰ درصدی پاسخ‌های دینامیکی، تأیید می‌کند. با این حال، عملکرد این سیستم در زلزله‌های حوزه دور ـ گسل با مدت تحریک طولانی (مانند لندرز) و فرکانس‌های غالب بالا (مانند کوبه) نیازمند بهینه‌سازی قوانین فازی برای کاهش خطاهای تطبیقی و بهبود شناسایی الگوی ارتعاش است. همچنین، استفاده از روش‌های ترکیبی (هیبریدی) برای ادغام مزایای کنترل فازی و کنترل بهینه خطی می‌تواند راهکاری امیدوارکننده برای پژوهش‌های آتی باشد.

واژه‌نامه

بیشینه شتاب زمین	Peak Ground Acceleration (PGA)
کنترل فازی	Fuzzy Logic Control
پاسخ دینامیکی سازه	Structural Dynamic Response
میراگر مایع تنظیم شونده	Tuned Liquid Damper (TLD)
کنترل نیمه‌فعال	Semi-Active Control
زلزله‌های حوزه نزدیک ـ گسل	Near-Fault Earthquakes
زلزله‌های حوزه دور ـ گسل	Far-Field Earthquakes
کنترل کننده بهینه خطی	Linear Quadratic Regulator (LQR)
کنترل غیرفعال	Passive Control
کنترل بنگ ـ بنگ	Bang-Bang Control
جذر مجموع مربعات	Root Mean Square (RMS)
آزمون واریانس دوسویه	Two-Way ANOVA
نرم افزار گراف پد پریزم	GraphPad Prism
خطای تطبیقی	Adaptation Drift
نیروهای ضربه ای	Impulsive Forces

سپاسگزاری

مراجع

[1] A. M. Rousta, S. Shoja, and M. Amin Safaei Ardakani, "Investigating Cyclic and Pushover Performance of Different Metallic Yielding Dampers," *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 122–143, 2023. https://doi.org/10.22075/jrce.2022.26848.1639

[2] A. M. Rousta, "Seismic retrofitting of steel moment-resisting frames (SMRFs) using steel pipe dampers," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 87, no. 1, pp. 69–84, 2023. https://doi.org/10.12989/sem.2023.87.1.069

[3] A. M. Rousta, M. Amin Safaei Ardakani, and S. Shoja, "Numerical and analytical investigation of seismic performance of steel dampers with different heights and shapes," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 208–227, 2022. (In Persian) https://doi.org/10.22065/jsce.2021.270979.2352

[4] R. A. Ibrahim and S. Barr, "Autoparametric resonance in a structure containing a liquid, Part I: two mode interaction," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 42, no. 2, pp. 159–179, 1975. https://doi.org/10.1016/0022-460X(75)90213-8

[5] R. A. Ibrahim and S. Barr, “Autoparametric resonance in a structure containing a liquid, Part II: three mode interaction,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 42, no. 2, pp. 181–200, 1975. https://doi.org/10.1016/0022-460X(75)90214-X

[6] M. J. Tait, A. A. El Damatty, N. Isyumov, and M. R. Siddique, “Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 20, no. 8, pp. 1007–1023, 2005. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2005.04.004

[7] J. S. Love and M. J. Tait, “Nonlinear simulation of a tuned liquid damper with damping screens using a modal expansion technique,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 26, no. 7-8, pp. 1058–1077, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2010.07.004

[8] S. M. Zahrai, S. Abbasi, B. Samali, and Z. Vrcelj, “Experimental investigation of utilizing TLD with baffles in a scaled down 5-story benchmark building,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 28, pp. 194–210, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.08.016

[9] S. M. Zahrai and H. Enayati, “Tuned Liquid Damper with Rotatable Baffles to Control a 5-Story Structure Model under Near and Far-Field Earthquakes,” *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 139–147, 2018.

[10] M. Gerami, A. Kheyroddin, and F. Khorasani, “Seismic Assessment of RCS Moment Frames under Near Fault Earthquakes,” *Journal of Civil Engineering Ferdowsi*, vol. 31, no. 2, pp. 1–23, 2018. (In Persian). https://doi.org/10.22067/civil.v31i1.54383

[11] S. M. Zahrai and A. Shafieezadeh, “Semi-active control of the wind-excited benchmark tall building using a fuzzy controller,” *Iranian Journal of Science & Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 1–18, Jan. 2009.

[12] A. Baghban, A. Karamodin, and H. Haji Kazemi, “The effect of fuzzy controller on damage of steel structure considering structural uncertainties,” *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, vol. 23, no. 6, pp. 2441–2450, 2016. https://doi.org/10.24200/sci.2016.2303

[13] W. S. Abdulateef and F. Hejazi, “Fuzzy logic based adaptive vibration control system for structures subjected to seismic and wind loads,” *Structures*, vol. 55, pp. 1507–1531, 2023. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.108

[14] A. Karamoddin and S. Khajeh Karamoddin, “Structural Damage Control Using Neuro-GA Algorithm,” *Journal of Civil Engineering Ferdowsi*, vol. 29, no. 1, pp. 1–17, 2017. (In Persian) https://doi.org/10.22067/civil.v29i1.33759

[15] S. Pourzineli, N. A. Fallah, and M. Akbari Aghbalagh, “Experimental Analysis of the TMD Control of Building Vibrations against Earthquake Excitations,” Journal of Civil Engineering Ferdowsi, vol. 25, no. 2, pp. 147–158, 2014. (In Persian)

[16] N. Khodaei and H. Teymouri, “Investigating the Impacts of the Mass and the Installation Height of TMD System on the Wind-Induced Vibration Control of Tall Buildings,” *Journal of Civil Engineering Ferdowsi*, vol. 35, no. 4, pp. 55–70, 2022. (In Persian) https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.70265.1039

[17] M. Abdeddaim, A. Ounis, N. Djedoui, and M. K. Shrimali, “Reduction of pounding between buildings using fuzzy controller,” *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 17, no. 7, pp. 985–1005, 2016.

[18] H. Enayati and A. M. Rousta, “The investigation of the effect of earthquake type on the structures behavior with Tuned Liquid Damper with Variable Baffles under Semi-Active Control,” *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, vol. 8, no. 4, pp. 77–92, 2022. https://doi.org/10.22065/jsce.2020.172223.1786

[19] M. Bahmaei and S. M. Zahrai, “Effect of selecting different membership functions on semi-active fuzzy control of adjacent buildings with MR damper,” *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 54, no. 12, pp. 4709–4728, 2023. https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21185.7644

[20] M. R. Zamanian, A. Kheyroldin, and A. R. Mortezaei, “Seismic response control of uncertainty stiffness structures subjected to near and far field earthquakes using fuzzy controlled magnetorheological dampers,” *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 54, no. 1, pp. 191–208, 2022. https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18497.6880

[21] M. Bahmai and S. M. Zahrai, “Fuzzy semi-active control of coupled adjacent structures with magneto-rheological damper under near-field and far-field earthquakes,” *Modares Civil Engineering Journal*, vol. 22, no. 6, 2023. https://doi.org/10.22034/22.6.95

[22] T. L. Teng, C. P. Peng, and C. Chuang, “A study on the application of fuzzy theory to structural active control,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 189, pp. 439–448, 2000. https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00300-X

[23] H. Enayati and S. M. Zahrai, “A variably baffled tuned liquid damper to reduce seismic response of a five-storey building,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, vol. 171, no. 4, pp. 306–315, 2018. https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00034

[24] S. M. Zahrai and H. Enayati, “Semi-Active Control of a SDOF Structure Using Tuned Liquid Damper with Variable Baffles,” *Journal of Structure & Steel*, vol. 11, no. 21, pp. 69–80, 2017.